测试版
Baidu文库

特别说明

此资料来自百度文库（http://wenku.baidu.com/）

您目前所看到的文档是使用的**抱米花百度文库下载器**所生成

此文档原地址来自

http://wenku.baidu.com/view/5afc782fed630b1c59eeb51f.html

感谢您的支持

抱米花

http://blog.sina.com.cn/lotusbaob

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

FLUENT 学习摘录

当你决定使 FLUENT 解决某一问题时，首先要考虑如下几点问题： 定义模型目标：从 CFD 模型中需要得到什么样的结果？从模型中需要得到什么样的精度；选择计算模型：你将如何隔绝所需要模拟的物理系统，计算区域的起点和终点是什么？在模型的边界处使用什么样的边界条件？二维问题还是三维问题？什么样的网格拓扑结构适合解决问题？物理模型的选取：无粘，层流还湍流？定常还是非定常？可压流还是不可压流？是否需要应用其它的物理模型？确定解的程序：问题可否简化？是否使用缺省的解的格式与参数值？采用哪种解格式可以加速收敛？使用多重网格计算机的内存是否够用？得到收敛解需要多久的时间？在使用 CFD 分析之前详细考虑这些问题，对你的模拟来说是很有意义的。

FLUENT 默认使用分离解算器，但是对于高速可压流（如上所述），强体积力导致的强烈耦合流动(比如浮力或者旋转力)，或者在非常精细的网格上的流动，你需要考虑隐式解法。这一解法耦合了流动和能量方程，常常很快便可以收敛。耦合隐式解所需要内存大约是分离解的 1.5 到 2 倍，选择时可以通过这一性能来权衡利弊。在需要隐式耦合解的时候，如果计算机的内存不够就可以采用分离解或者耦合显式解。耦合显式解虽然也耦合了流动和能量方程，但是它还是比耦合隐式解需要的内存少，但是它的收敛性相应的也就差一些。

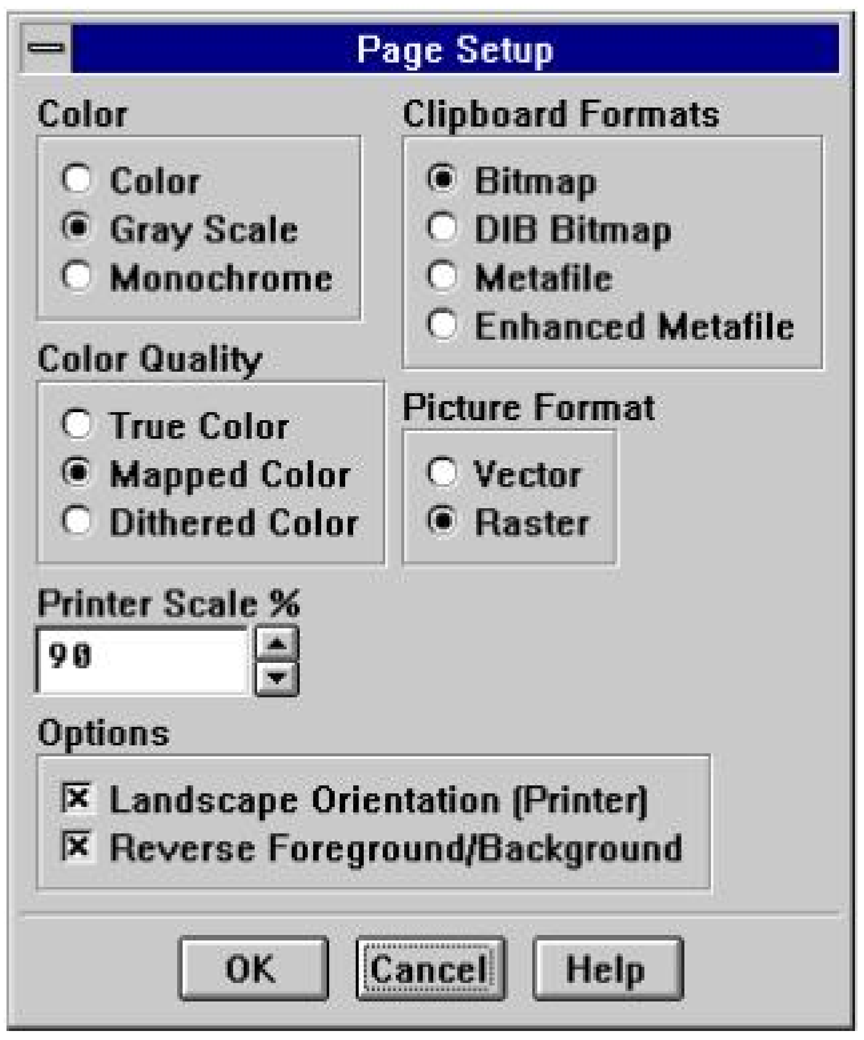
对于 Moving Wall 的设定，如果你模拟的是旋转参考系，你不必担心相对运动和绝对运动的设定，它们是等价的。

所有的面板（设置信息）都包含 Help 按钮，用于显示如何使用面板的信息。

Windows NT 系统的特有的输出图形显示窗口功能：
如果你选择的是 Windows NT 版本的 FLUENT，点击图形窗口的左上角便可以显示图形窗口系统菜单，该菜单包括常用系统命令如：move，size 和 close。连同系统命令一起，FLUENT 为支持打印机和剪贴板增加了三条命令：

1. 复制到剪贴板：将当前图形复制到 Windows 的剪贴板。可以用页面设置面板改变复制的属性。图形窗口的大小影响了图形中所使用的字的大小。
2. 打印：将当前图形复制到打印机。可以用页面设置面板改变打印的属性。
3. 页面设置：显示页面设置面板。

Windows NT 系统独有的页面设置面板功能：在图形显示窗口的 system 菜单中点击 Page Setup..菜单，弹出页面设置面板如下：



第一个 Color：允许你选择是否使用彩色图

第二个 Color：选择彩色图形
Gray Scale：选择灰度比例图
Monochrome：选择黑白图
Color Quality：允许你指定图形的色彩模式
True Color： 创建一个由RGB值定义的图，这假定了你的打印机或者显示器有至少65536个色彩或无限色彩。
Mapped Color：用色彩图创建图形，这对于只有 256 色的设备是一个不错的选择
Dithered Color：用 20 个或更少的色彩创建一个颤动图
Clipboard Formats： 允许你选择所需格式复制到剪贴板。图形窗口的大小会影响剪贴板图形的尺寸。要得到最好的结果最好是调节图形窗口的尺寸并用 Windows 剪贴板查看器检查剪贴板图形。
Bitmap：图形窗口以位图形式复制
DIB Bitmap：是一个与设备有关的图形窗口位图复制
Metafile：是一个 Windows 图元文件
Enhanced Metafile：是一个 Windows 增强图元文件 2
Picture Format：允许你指定光栅和矢量图
Vector： 创建矢量图，这一格式在打印时有很高的清晰度，但是一些大的 3D 图可能会花很长时间来打印
Raster： 创建光栅图，这一格式在打印时有相对较低的清晰度，但是一些大的 3D 图可能会花较少时间来打印
Printer Scale %：控制打印图形覆盖页面的范围，减少尺度会有效的增加图形页面的空白。
Options：包括控制图形其它属性的选项
Landscape Orientation (Printer)：指定图形的方向。如果选上该选项，图形将会在前景（landscape）模式中形成，否则是在肖像（portrait）模式下形成。该选项只在输出时应用。

Reverse Foreground/Background：如果选定就会使图形的前景和背景颜色互换。这一功能可以使你复制白前景黑背景的图为黑前景白背景。

使用图形硬拷贝面板

要设定硬拷贝参数并保存硬拷贝文件，你就需要使用图形硬拷贝面板(Figure 1). 点击菜单：File/Hardcopy...。

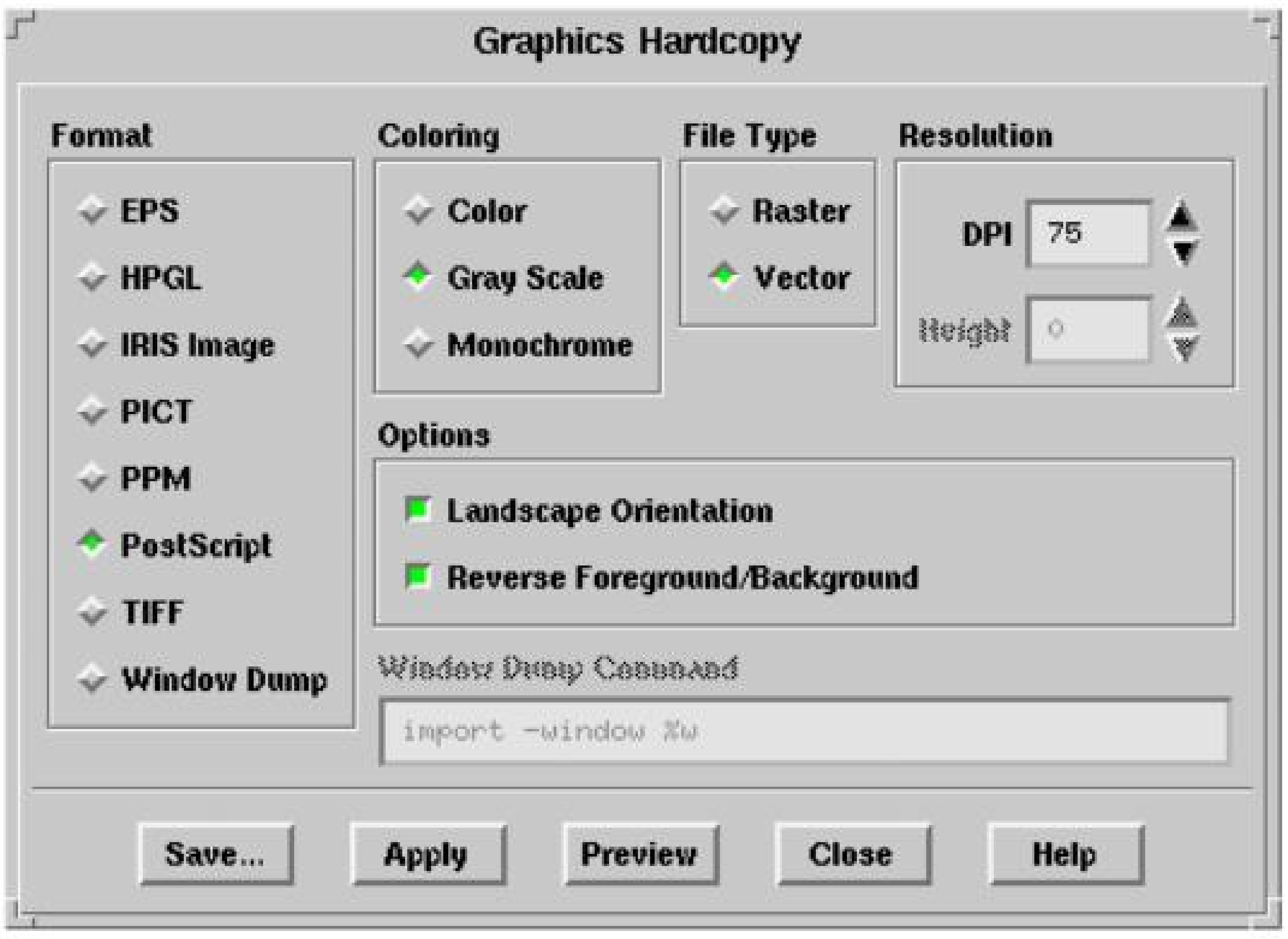


Figure 1:图形硬拷贝面板

下面是保存硬拷贝文件的程序，后面还会详细叙述

1. 选择硬拷贝格式
2. (可选)指定文件类型（如果可用）

3. 设定颜色
4. (可选)定义分辨率（如果可用）
5. 设定硬拷贝选项的中的任何选项
6. 如果你产生一个窗口的倾倒（dump），制定倾倒命令
7. (可选)预览结果
8. 点击保存按钮，并在选择文件对话框中输入文件名

如果你想保存当前的硬拷贝设定，但是还不想保存当前的硬拷贝，你可以点击应用（Apply）按钮。应用的设定将会成为后来硬拷贝的默认设定。

选择硬拷贝文件的格式，在格式下拉列表中选择：

EPS (Encapsulated PostScript) 该输出和 PostScript 输出一样，只是附加了 Adobe 文档协议(v2)的声明。目前，在 EPS 输出中不包括位图的预览。通常说来，虽然实际的矢量 PostScript 信息是用来打印的，但是读入 EPS 文件的程序是用预览位图来显示在屏幕上的。你可以将 EPS 文件保存为光栅或者矢量格式。

HPGL 为 pen plotters 设计的矢量文件格式。HPGL 驱动器支持有限的颜色设定，对于有些场景无法正确着色。

IRIS Image 在 SGI 计算机上是自然的光栅格式图形文件，IRIS 图形驱动器并不是在哪个平台上都可以得到

PICT 在 Macintosh 计算机上是自然的图形文件。PICT 文件既可以包含光栅信息也可以包含矢量信息或者都包含。一般说来，"draw"程序产生矢量信息，"paint"程序使用光栅格式。你可以选择文件的保存格式。

PPM 输出为一般的光栅格式文件

PostScript 是一个一般的矢量文件格式，你也可以将 PostScript 文件保存为光栅格式

TIFF 是一个一般的光栅格式，TIFF 驱动器并不是在哪个平台上都可以得到

Window Dump (只用于 UNIX 系统)选择窗口倾倒操作产生硬拷贝。这种格式需要你指定适当的窗口倾倒命令。

选择文件类型

如果你保存 PostScript, EPS,或 PICT 文件，你可以选择光栅或者矢量文件类型。矢量图形定义图形显示为原始几何图形如：线、多边形和文本的组合。光栅文件定义图像中的每一个像素点的颜色。矢量图可以升级到任何分辨率，光栅图只有固定的分辨率。支持矢量图的有 PostScript, Encapsulated PostScript (EPS), HPGL, 以及 PICT。支持光栅图的有 IRIS 图像 , PICT, PostScript, Encapsulated PostScript,以及 TIFF。

一般说来，对于最快的输出时间，你应该将简单的二维图保存为矢量文件，复杂场景保存为光栅图。

指定颜色模式

对于除了窗口倾倒格式之外的所有格式，你都可以指定硬拷贝文件所要使用的颜色。对于彩色标度复制选择 Color，对于灰色标度复制选择 Gray Scale，对于黑白复制选择 Monochrome。注意：对于大多数单色 PostScript，会在灰的阴影处产生彩色图，但是不能够保证彩色坡度随着灰度坡度线性增长，你应该选择 Gray Scale。

定义分辨率

对于光栅硬拷贝文件，你可以通过制定大小来控制硬拷贝图形的分辨率。在分辨率选项中选择宽度和高度，如果宽度和高度都是零，因拷贝文件的分辨率和图形窗口的分辨率一样。要检查图形窗口以像素点为单位的尺寸键入文本命令：display/set/rendering-options/device-info。注意：对于 PostScript, EPS, 和 PICT 文件，你需要指定每一英寸的点的分辨率而不是高度和宽度。

硬拷贝选项

对于除了窗口倾倒之外的所有硬拷贝格式，你可以在选项中控制两个附加的设定。首先你可以用

Landscape Orientation 按钮来指定硬拷贝的方向。如果这一项打开，硬拷贝就是在前景（landscape）模式中，否则是肖像（portrait）模式。其次你可以用 Reverse Foreground/Background 来控制前景和背景的颜色。如果这一项打开，硬拷贝图形窗口的前景和背景的颜色就会交换。这一功能可以用于黑白背景的硬拷贝操作。

FLUENT 提供了可以加速 PostScript 文件保存的选项。这一选项可以在文本菜单 display/set/hardcopy/driver/post-format 中找到。

fast-raster 允许一个比标准光栅文件大的光栅文件，但是输出更快

raster 输出标准光栅文件

rle-raster 允许一个 run-length 编码的光栅文件，它和标准光栅文件一样大，但是输出稍快。（这是默认的文件类型）。

vector 允许标准的矢量文件

窗口倾倒“Window Dumps”（只用于 UNIX 系统)

如果你选择窗口倾倒格式，程序会是用特定的窗口倾倒命令来保存硬拷贝文件。例如：如果你想用 xwd 来捕捉窗口，你选择的窗口倾倒命令为：

xwd -id %w >

在倾倒时，FLUENT 会自动解释“%w”为激活窗口的 ID 号。在选择文件对话框中点击保存按钮，输入文件名即可(比如：myfile.xwd)。

如果你打算做一个动画，你可以将窗口倾倒保存为几个标数的文件，变量为“%n”。然后你就可以使用上面所述的窗口倾倒命令，但是在选择文件对话框中你的文件名应该输入为：myfile%n.xwd

每次你创建了一个新的窗口倾倒，“%n”的值就会加一，所以不需要你手动添加。

如果你打算使用 ImageMagick 动画程序，将文件保存为 MIFF 格式效率会更高。这是你需要使用 ImageMagick 工具输入。对于窗口倾倒命令你需要输入：import -window %w（这是默认命令）。当你点击保存按钮之后，会弹出选择文件对话框，文件名后缀.miff 指定输出格式为 MIFF。

窗口倾倒命令是系统和图形驱动指定的，所以它强烈的依赖于你的详细配置

当保存的窗口倾倒时另一个需要考虑的问题是，窗口倾倒会在窗口显示时精确捕捉窗口，其中包括分辨率，颜色和透明度等。(正是这个原因使得你使用窗口倾倒格式时，在图形硬拷贝面板中的这些功能被取消了)。如果你使用 8 位图形显示，你可能需要使用一个内置的光栅驱动器（如 TIFF）来产生高质量的 24 位颜色输出

预览硬拷贝图像

在你保存硬拷贝文件之前，你可能会选择预览所要保存的图形。点击预览按钮你就可以查看当前设定下的图形，如果不满意，可以在保存文件之前进行任何的修改，以提高硬拷贝的质量。

在进行网格适应的时候必须保存新的 case 文件和 data 文件，否则新的 data 据文件将和 case 文件不符。如果你不保存一个更新的 case 或 data 文件，FLUENT 会给出警告。

在计算过程中一般是需要自动保存文件的，否则因为断电等故障可能造成计算前功尽弃。FLUENT 允许我们在计算时设定间隔保存文件。这一功能在时间相关计算时是非常有用的，因为它使得我们不必中断计算来保存结果。对于定常问题也可以使用自动保存功能，从而可以检验迭代过程中不同状态的解。

定常流是在迭代中指定保存频率，非定常流是在时间步中指定保存频率（若使用显式时间步进法也是在迭代中设定保存频率）。如果保存频率是 10，那么在定常计算中每迭代 10 步保存一次。FLUENT 自动保存不同的文件类型，用后缀来区分.cas、dat、gz 或者.Z。所有自动保存的设置都存在 case 文件中。

选择适当的网格类型

FLUENT 在二维问题中可以使用由三角形、四边形或混合单元组成的网格，在三维问题中可以使用四面体，六面体，金字塔形以及楔形单元，或者两种单元的混合。网格的选择依赖于具体的问题，在选择网格的

时候，你应该考虑下列问题：

- 初始化的时间
- 计算花费
- 数值耗散

后面将会详细讨论各种类型网格的特点。

初始化的时间

很多实际问题是具有复杂几何外形的，对于这些问题采用结构网格或块结构网格可能要花费大量的时间，甚至根本无法得到结构网格。复杂几何外形初始化时间的限制刺激了人们在非结构网格中使用三角形网格和四面体网格。然而，如果你的几何外形并不复杂的话，两种方法所耗费的时间没有明显差别

如果你已经有了结构网格代码如 FLUENT 4 生成的网格，那么在 FLUENT 中使用该网格会比重新生成网格节约大量的时间。这一特点也刺激了人们在 FLUENT 仿真中使用四边形网格和六面体网格。注意：FLUENT 有一个格式转换器允许你从其它程序中读入结构网格。

计算花费

当几何外形太复杂或者流动的长度尺度太大时，三角形网格和四面体网格所生成的单元会比等量的包含四边形网格和六面体网格的单元少得多。这是因为三角形网格和四面体网格允许单元聚集在流域的所选区域，而四边形网格和六面体网格会在不需要加密的地方产生单元。非结构的四边形网格和六面体网格为对于一般复杂外形提供了许多三角形和四面体网格的优点。

四边形和六边形单元的一个特点就是它们在某些情况下可以允许比三角形/四面体单元更大的比率。三角形/四面体单元的大比率总会影响单元的歪斜。因此，如果你有相对简单的几何外形，而且流动和几何外形很符合，比如长管，你就可以使用大比率的四边形和六边形单元。这种网格可能会比三角形/四面体网格少很多单元。

数值耗散

多维条件下主要的误差来源就是数值耗散又被称为虚假耗散（之所以被称为虚假的，是因为耗散并不是真实现象，而是它和真实耗散系数影响流动的方式很类似）。

关于数值耗散有如下几点：

- 当真实耗散很小时，即对流占主导地位时，数值耗散是显而易见的。
- 所有的解决流体问题的数值格式都会有数值耗散，这是因为数值耗散来源于截断误差，截断误差是描述流体流动的离散方程导致的。
- FLUENT 中所用的二阶离散格式可以帮助减少解的数值耗散的影响。
- 数值耗散量的大小与网格的分辨率成反比。因此解决数值耗散问题的一个方法就是精化网格。
- 当流动和网格成一条直线时数值耗散最小（所以我们才要使用结构网格来计算啊）

最后一点和网格选择最有关系。很明显，使用三角形/四面体网格流动永远不会和网格成一条直线，而如果几何外形不是很复杂时，四边形网格和六面体网格可能就会实现流动和网格成一条线。只有在简单的流动，如长管流动中，你才可以使用四边形和六面体网格来减少数值耗散，而且在这种情况下使用四边形和流面体网格有很多优点，因为与三角形/四面体网格相比你可以用更少的单元得到更好的解。

网格所需条件和所要考虑的问题

本节讨论了特殊几何图形和网格的必要条件以及网格质量的一般评价方法。

几何图形和网格的必要条件

在计划解决你的问题的开始，应该注意下面的几何图形设定以及网格结构的必要条件。

- 对于轴对称图形来说，必须定义笛卡尔坐标系的 x 轴为旋转轴 (Figure 1).
- 周期性边界条件要具有周期性网格，虽然 GAMBIT 和 TGrid 能够产生真正的周期性边界，但是 GeoMesh

和大多数 CAD 软件包是无法产生周期性边界条件的。如果下面的条件需要满足的话，TGrid 提供了 GeoMesh 和大多数 CAD 软件产生的三角形表面网格生成周期性边界的功能。

1. 周期及其内部在它们的边界曲线上有相同的节点分布。
2. 周期及其内部的节点与常数平动因子和转动因子有关。

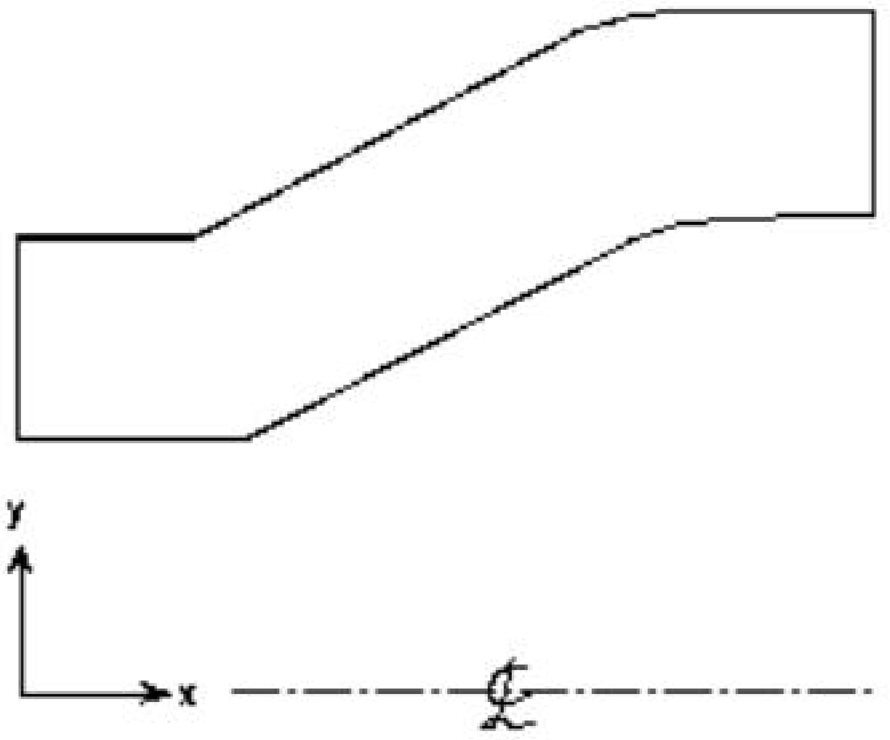


Figure 1:轴对称图形必须以 x 轴为中线

详情请见 GAMBIT 和 TGrid 的帮助文件。

如果你用 GeoMesh 和大多数 CAD 软件产生四边形网格和六面体网格，你必须保证在周期性区域内的网格是相同的。然后便可以在 FLUENT 中使用 make-periodic 命令建立周期性边界。详细内容请参阅“创建周期性区域”一节。(你能够在解算器中对三角形或四面体网格创建周期性边界条件而不用上面所述的 TGrid 来创建)

网格质量

网格质量对计算精度和稳定性有很大的影响。网格质量包括：节点分布，光滑性，以及歪斜的角度（skewness）。

节点密度和聚集度

连续性区域被离散化使得流动的特征解（剪切层，分离区域，激波，边界层和混合区域）与网格上节点的密度和分布直接相关。在很多情况下，关键区域的弱解反到戏剧化的成了流动的主要特征。比如：由逆压梯度造成的分离流强烈的依靠边界层上游分离点的解。

边界层解（即网格近壁面间距）在计算壁面剪切应力和热传导系数的精度时有重要意义。这一结论在层流流动中尤其准确，网格接近壁面需要满足：

$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{v_x}} \le 1$$

其中

y_p=从临近单元中心到壁面的距离；u_∞=自由流速度 ；v=流体的动力学粘性系数 ；x= 从边界层起始点开始沿壁面的距离。上面的方程基于零攻角层流流动的 Blasius 解[139]。

网格的分辨率对于湍流也十分重要。由于平均流动和湍流的强烈作用，湍流的数值计算结果往往比层流更容易受到网格的影响。在近壁面区域，不同的近壁面模型需要不同的网格分辨率。

一般说来，无流动通道应该用少于 5 个单元来描述。大多数情况需要更多的单元来完全解决。大梯度区域如剪切层或者混合区域，网格必须被精细化以保证相邻单元的变量变化足够小。不幸的是要提前确定流动特征的位置是很困难的。而且在复杂三维流动中，网格是要受到 CPU 时间和计算机资源的限制的。在解运行时和后处理时，网格精度提高，CPU 和内存的需求量也会随之增加。自适应网格技术可用于在流场的发展基

础上提高和/或减少网格密度，并因此而提供了网格使用更为经济的方法。
光滑性

临近单元体积的快速变化会导致大的截断误差。截断误差是指控制方程偏导数和离散估计之间的差值。FLUENT 可以改变单元体积或者网格体积梯度来精化网格从而提高网格的光滑性

单元的形状

单元的形状（包括单元的歪斜和比率）明显的影响了数值解的精度。单元的歪斜可以定义为该单元和具有同等体积的等边单元外形之间的差别。单元的歪斜太大会降低解的精度和稳定性。比方说：四边形网格最好的单元就是顶角为 90 度，三角形网格最好的单元就是顶角为 60 度。比率是表征单元拉伸的度量。正如在计算花费一节所讨论的，对于各向异性流动，过渡的比率可以用较少的单元产生较为精确的结果。但是一般说来应该尽量避免比率大于 5:1。

流动流场相关性

分辨率、光滑性、单元外形对于解的精度和稳定性的影响强烈的依赖于所模拟的流场。例如：在流动开始的区域可以忍受过渡歪斜的网格，但是在具有大流动梯度的区域这一特点可能会使得整个计算无功而返。因为大梯度区域是无法预先知道的，所以我们只能尽量的使整个流域具有高质量的网格。

下面对流动边界条件的使用作一概述

对于流动的出入口，FLUENT 提供了十种边界单元类型：速度入口、压力入口、质量入口、压力出口、压力远场、质量出口，进风口，进气扇，出风口以及排气扇。

下面是 FLUENT 中的进出口边界条件选项：

- 速度入口边界条件用于定义流动入口边界的速度和标量。在这个边界条件中，流动总的（驻点）的属性不是固定的，所以无论什么时候提供流动速度描述，它们都会增加。这一边界条件适用于不可压流，如果用于可压流它会导致非物理结果，这是因为它允许驻点条件浮动。你也应该小心不要让速度入口靠近固体妨碍物，因为这会导致流动入口驻点属性具有太高的非一致性。
- 压力入口边界条件用来定义流动入口边界的总压和其它标量。它即可以适用于可压流，也可以用于不可压流。压力入口边界条件可用于压力已知但是流动速度和/或速率未知的情况。这一情况可用于很多实际问题，比如浮力驱动的流动。压力入口边界条件也可用来定义外部或无约束流的自由边界。
- 质量流动入口边界条件用于可压流规定入口的质量流速。在不可压流中不必指定入口的质量流，因为当密度是常数时，速度入口边界条件就确定了质量流条件。该边界条件用于规定入口的质量流量。为了实现规定的质量流量中需要的速度，就要调节当地入口总压。这和压力入口边界条件是不同的，在压力入口边界条件中，规定的是流入驻点的属性，质量流量的变化依赖于内部解。

当匹配规定的质量和能量流速而不是匹配流入的总压时，通常就会使用质量入口边界条件。比如：一个小的冷却喷流流入主流场并和主流场混合，此时，主流的流速主要的由（不同的）压力入口/出口边界条件对控制。

调节入口总压可能会导致节的收敛，所以如果压力入口边界条件和质量入口条件都可以接受，你应该选择压力入口边界条件。在不可压流中不必使用质量入口边界条件，因为密度是常数，速度入口边界条件就已经确定了质量流。

- 压力出口边界条件用于定义流动出口的静压（在回流中还包括其它的标量）。当出现回流时，使用压力出口边界条件来代替质量出口条件常常有更好的收敛速度。静压值的指定只用于亚声速流动。如果当地流动变为超声速，就不再使用指定压力了，此时压力要从内部流动中推断。所有其它的流动属性都从内部推出。在解算过程中，如果压力出口边界处的流动是反向的，回流条件也需要指定。如果对于回流问题你指定了比较符合实际的值，收敛性困难就会被减到最小。

即使在收敛解中没有回流，你也应该设定比较现实的值来最小化收敛的困难，这是因为回流在计算过程中确实出现了。

FLUENT 还提供了使用平衡出口边界条件的选项。要使这个选项激活，打开辐射平衡压力分布。当这一功能被激活时，指定的 gauge 压力只用于边界处的最小半径位置（相对于旋转轴）。其余边界的静压是从辐射速度可忽略不计的假定中计算出来的。注意：辐射平衡出口条件，只用于三维或者轴对称涡流计算。

- 压力远场条件用于模拟无穷远处的自由可压流动，该流动的自由流马赫数以及静态条件已经指定了。这一边界类型只用于可压流。
- 质量出口边界条件（Out_Flow）用于在解决流动问题之前，所模拟的流动出口的流速和压力的详细情况还未知的情况。在流动出口是完全发展的时候这一条件是适合的，这是因为质量出口边界条件假定出了压力之外的所有流动变量正法向梯度为零。对于可压流计算，这一条件是不适合的。

注意：下面的几种情况不能使用质量出口边界条件：如果包含压力出口，请使用压力出口边界条件；如果模拟可压流；如果模拟变密度的非定常流，即使流动是不可压的也不行。

流出单元应用零扩散流量意味着流出边界的平面是由区域内部推导出来，而对上游流动没有影响。当流出边界面积不变时，在假定与完全发展的流动相容的基础上，FLUENT 使用相应的推导程序，更新流出速度和压力。

FLUENT 在流出边界所应用的零扩散流量条件在物理上接近于完全发展流动。所谓的完全发展流动是指在流动方向上流动速度轮廓（和/或其它诸如温度属性的轮廓）不改变。注意，在质量出口边界条件中垂直于流向可能会由速度梯度。只有在垂直于出口平面的扩散流量被假定为零。

正如前面所述，质量出口边界条件要保证流动是完全发展的，出口方向上的所有流动变量的扩散流量为零。但是，你也可以在流动没有完全发展的物理边界定义质量出口边界条件，在这种情况下你首先要有把握保证出口处的零扩散流量对流动解没有很大的影响。

下面是使用质量出口边界的一个例子：

质量出口边界的法向梯度可以忽略不计：下图是一个简单的二维问题，有几个可能的质量出口边界。位置(D)表明流动边界在通风口的出口。在这里，假定对流占支配优势，边界条件非常符合，质量出口的位置也很得当。位置(C)是在通风口出口的上游，在这里流动是完全发展的。因此质量出口边界条件在这里也很合适。

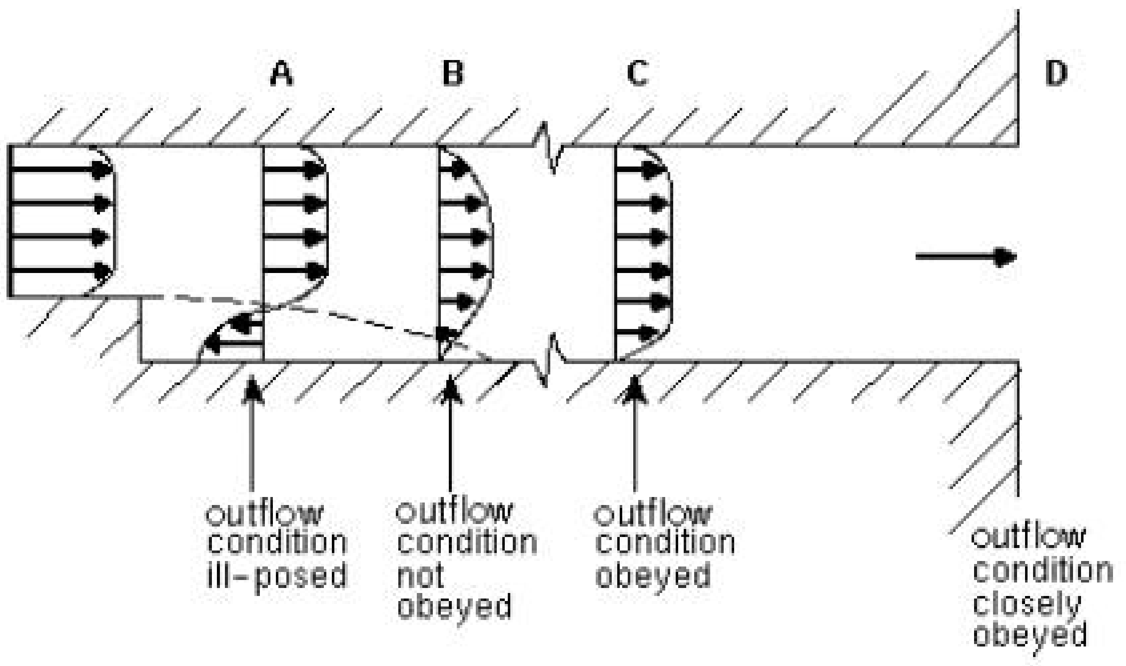


Figure 1:质量出口边界位置的选择

质量出口边界的错误位置：位置(B) 表明质量出口边界在后向表面步中，接近流动的再附着点。这样的选择是错误的，因为在回流点处垂直于出口表面的梯度相当的大，它会对流场上游有很大的影响。因为质量出口边界条件忽略这些流动的轴向梯度，所以位置(B)是一个较差的质量出口边界。出口位置应该移到再附着点的下游。

位置(A)是第二个质量出口边界的错误位置。在这里流动又通过质量出口边界回流到 FLUENT 计算域中。像这种情况，FLUENT 计算就不会收敛，计算的结果根本就没有用。这是因为当流动通过质量出口又回流到计算区域时，通过计算区域的质量流速是浮动的或者是未定义的。除此之外，当通过质量出口流入计算区域时，流动的标量属性是未定义的 (FLUENT 在流域内使用邻近于质量出口流体的温度来选择温度)。因此你应该以怀疑的观点来察看包括通过质量出口进入流域的所有计算。对于这样的计算，推荐使用压力出口边界条件。

注意：如果在计算中的任何点有回流流过质量出口边界，甚至解的最后结果不排除到区域内有任何的回流，收敛性都会受到影响。这一情况在湍流中尤其要注意。

- 进风口边界条件用于模拟具有指定的损失系数，流动方向以及周围（入口）环境总压和总温的进风口。

- 进气扇边界条件用于模拟外部进气扇，它具有指定的压力跳跃，流动方向以及周围（进口）总压和总温。
- 通风口边界条件用于模拟通风口，它具有指定的损失系数以及周围环境（排放处）的静压和静温。
- 排气扇边界条件用于模拟外部排气扇，它具有指定的压力跳跃以及周围环境（排放处）的静压。

移动壁面的定义

壁面边界条件用于限制流体和固体区域。在粘性流动中，壁面处默认为非滑移边界条件，但是你也可以根据壁面边界区域的平动或者转动来指定切向速度分量，或者通过指定剪切来模拟滑移壁面(你也可以在 FLUENT 中用对称边界类型来模拟滑移壁面，但是使用对称边界就需要在所有的方程中应用对称条件。详情请参阅对称边界条件一节)。在当地流场的详细资料基础上可以计算出流体和壁面之间的剪应力和热传导。

如果邻近壁面的单元区域是移动的，（比如你使用移动参考系或者滑动网格）你可以激活相对邻近单元区域选项来选择指定的相对移动区域的移动速度。如果指定相对速度，那么相对速度为零意味着在相对坐标系中壁面是静止的，因此在绝对坐标系中以相对于邻近单元的速度运行。如果选择绝对速度（激活绝对选项），速度为零就意味着壁面在绝对坐标系中是静止的，而且以相对于邻近单元的速度以动，但是在相对坐标系中方向相反。

如果你使用一个或多个移动参考系、滑动网格或者混合平面，并且你希望壁面固定在移动参考系上。推荐你指定相对速度（默认）而不是绝对速度。然后，如果你修改邻近单元区域的速度，就像你指定绝对速度一样，你就不需要对壁面速度做任何改变。

注意：如果邻近单元不是移动的那么它和相对选项是等同的。

对于包括线性，壁面边界是平动的问题（如以移动带作为壁面的矩形导管），你可以激活平动选项，并指定壁面速度和方向(X,Y,Z 矢量)。作为默认值，通过指定平动速度为零，壁面移动是未被激活的。

对于包括转动壁面运动的问题，你可以激活转动选项，并对指定的旋转轴定义旋转速度。要定义轴，请设定旋转轴方向和和旋转轴原点。这一轴和邻近单元区域所使用的旋转轴是无关的，而且和其它的壁面旋转轴无关。对于三维问题旋转轴是通过指定坐标原点的矢量，它平行于在旋转轴方向框中指定的从(0,0,0)到(X,Y,Z)的矢量。对于二维问题，你只需要指定旋转轴起点，旋转轴是通过指定点的 z 向矢量。对于二维轴对称问题，你不必定义旋转轴：通常是绕 x 轴旋转，起点为(0,0)。

需要注意的是，只有在壁面限制表面的旋转时，模拟切向旋转运动才是正确的(比如圆环或者圆柱)。还要注意只有对静止参考系内的壁面才能指定旋转运动。

在湍流壁面限制的流动中模拟壁面粗糙度的影响

流过粗糙表面的流体会有各种各样的情况。比如流过机翼表面、船体、涡轮机、换热器以及管系统的流动，还有具有各种粗糙度的地面上的大气边界层。壁面粗糙度影响了壁面处的阻力、热传导和质量输运。

如果你是在模拟具有壁面限制的湍流流动，壁面粗糙度的影响是很大的，你可以通过修改壁面定律的粗糙度来考虑避免粗糙度影响。

粗糙管和隧道的实验表明了当用半对数规则画图时，近粗糙壁面的平均速度分布具有相同的坡度(1/k)但是具有不同的截止点(在对数定律中附加了常数 B)。对于粗糙壁面，平均速度的壁面定律具有的形式为：

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w/\rho} = \frac{1}{\tau}\ln\left(E\frac{\rho u^* y_p}{\mu}\right) - \Delta B$$

其中 u^* = C_m^1/4k^1/2；ΔB 是粗糙度函数，它衡量了由于粗糙影响而导致的截止点的转移。一般说来，ΔB 依赖于粗糙的类型(相同的沙子、铆钉、螺纹、肋、铁丝网等)和尺寸。对于各种类型的粗糙情况没有统一而有效的公式。然而，对于沙粒粗糙情况和各种类型的统一粗糙单元，人们发现 ΔB 和无量纲高度 K_s ^+ = r K_s u^*/m 具有很好的相关性，其中 K_s 是物理粗糙高度 u^* = C_m^1/4k^1/2。实验数据分析表明粗糙函数 ΔB 并不是 K_s^+的单值函数，而是依赖于 K_s^+的值有不同的形式。观察表明有三种不同的类型：

- 液体动力光滑(K_s^+ < 3 ~ 5)

- 过渡区(3 ~ 5 < K_s^+ < 70 ~ 90)
- 完全粗糙(K_s^+ > 70 ~ 90)

根据上述数据，在光滑区域内粗糙度的影响可以忽略，但是在过渡区域就越来越重要了，在完全粗糙区域具有完全的影响。

在 FLUENT 中，整个粗糙区域分为三个区域。粗糙函数 ΔB 的计算源于 Nikuradse's 数据[27]基础上的由 Cebeci 和 Bradshaw 提出的公式：

对于液体动力光滑区域(K_s^+ < 2.25)：

$$\Delta B = 0$$

对于过渡区(2.25 < K_s^+ < 90)：

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa}\ln\left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.25} + C_{K_s} K_s^+\right] \times \sin\left\{0.4258\left(\ln K_s^+ - 0.811\right)\right\}$$

其中 C_K_s 为粗糙常数，依赖于粗糙的类型。

在完全粗糙区域(K_s^+ > 90)：

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa}\ln\left(1 + C_{K_s} K_s^+\right)$$

在解算器中，给定粗糙参数之后，粗糙函数 ΔB (K_s^+)用相应的公式计算出来。方程 1 中的修改之后的壁面定律被用于估计壁面处的剪应力以及其它的对于平均温度和湍流量的壁面函数。

要模拟壁面粗糙的影响，你必须指定两个参数：粗糙高度 K_s 和粗糙常数 C_K_s。默认的粗糙高度为零，这符合光滑壁面。对于产生影响的粗糙度，你必须指定非零的 K_s。对于同沙粒粗糙情况，沙粒的高度可以简单的被看作 K_s。然而，对于非同一沙粒平均直径(D_50)应该是最有意义的粗糙高度。对于其它类型的粗糙情况，需要用同等意义上的沙粒粗糙高度 K_s。

适当的粗糙常数(C_K_s)主要由给定的粗糙情况决定。默认的粗糙常数(C_K_s = 0.5)是用来满足在使用 k-e 湍流模型时，它可以在具有同一沙粒粗糙的充满流体的管中再现 Nikuradse's 阻力数据。当你模拟和同一沙粒粗糙不同的情况时，你就需要调解粗糙常数了。例如，有些实验数据表明，对于非同一沙粒、肋和铁丝网，粗糙常数(C_K_s = 0.5 ~ 1.0)具有更高的值。不幸的是，对于任意类型的粗糙情况还没有一个清楚的选择粗糙常数 C_K_s 的指导方针。

需要注意的是，要求邻近壁面单元应该小于粗糙高度并不是物理意义上的问题。对于最好的结果来说，要保证从壁面到质心的距离要比 K_s 大。

指定层流区域

如果你使用 k-e 模型或者 Spalart-Allmaras 模型来模拟湍流，在指定的流体区域关掉湍流模拟是可能的(即：使湍流生成和湍流粘性无效，但是湍流性质的输运仍然保持)。如果你知道在某一区域流动是层流这一功能是很有用的。比方说：如果你知道机翼上的转唳点的位置，你可以在层流单元区域边界和湍流区域边界创建一个层流/湍流过渡边界。这一功能允许你模拟机翼上的湍流过渡。要在流体区域内取消湍流模拟，请在流体面板中打开层流区域选项。

小于或等于 1%的湍流强度通常被认为低强度湍流，大于 10%被认为是高强度湍流。从外界，测量数据的入口边界，你可以很好的估计湍流强度。例如：如果你模拟风洞试验，自由流的湍流强度通常可以从风洞指标中得到。在现代低湍流风洞中自由流湍流强度通常低到 0.05%。

记住速度的正负分量和坐标方向的正负是相同的。

操作压力

对于不同的流动状态，操作压力的指定以不同的方式影响你的计算。本节介绍了操作压力的相关信息，对不同情况的相关性，如何正确的设定它。

在低马赫数流动中压力计算的数值截断的影响

在低马赫数可压流动中，全部的压降和绝对静压相比很小，因此数值截断会对其有很大的影响。比方说吧，考虑 M << 1 的可压流动。压力变化 D p 与动压头(1/2) c p M^2 有关，其中 p 是静压，c 是指定的比热比。这就给出了 D p/p 和 M^2 的关系式，以至于 M——〉0 时 D p/p——〉0。因此，除非给予足够的注意，否则低马赫数流动计算结果往往很容易会受到截断误差截断误差的影响。

操作压力、标准压力和绝对压力

FLUENT 通过从绝对压力中减去操作压力（一般说来大的压力粗略的等于流动中绝对压力的平均值）来避免截断误差（见在低马赫数流动中压力计算的数值截断的影响一节）产生的问题，并使用得到的压力来计算，这个压力称作标准压力。下面是操作压力，标准压力和绝对压力之间的关系式。绝对压力是操作压力和标准压力之和：

$$p_{abs} = p_{op} + p_{gauge}$$

你所指定的所有压力以及 FLUENT 所报告和计算的压力都是标准压力。

设定操作压力

操作压力的意义

操作压力对于不可压理想气体流动来说是十分重要的，因为它直接决定了不可压理想气体定律所计算出来的密度，不可压理想气体定律计算密度的关系式为：r = (p_op/R T)。因此，你必须保证适当的设定操作压力。

操作压力在低马赫数可压流动中具有十分重要的意义，因为它在避免截断误差问题中扮演了重要的角色，如操作压力，标准压力和绝对压力一节所述。同样地，你必须保证适当地设定操作压力。

对于高马赫数可压流动，操作压力的意义就不是很明显了。在这种情况下，压力的变化比低马赫数可压流动中压力的变化大得多，因此截断误差不会产生什么实际的问题，因此也就不真正需要使用标准压力。事实上，在这种计算中使用绝对压力通常会更方便。因为 FLUENT 总是使用标准压力，所以你可以简单的设定操作压力为零，而使标准压力和绝对压力相等。

如果密度假定为常数，或者密度是从温度的轮廓函数中推导出来，那么根本就不使用操作压力。需要注意的是：默认的操作压力为 101325 Pa。

如何设定操作压力

选择合适的操作压力的判据是基于流动马赫数的区域以及确定密度的关系式。例如：如果你在不可压流动的计算中使用理想气体定律（如自然对流问题），你应该使用平均流动压力的典型值。

下表是设定操作压力的推荐方法。请记住默认的操作压力为 101325 Pa。

Density Relationship	**Mach Number Regime**	**Operating Pressure**
Ideal Gas Law	$M > 0.1$	0 or $\approx$ Mean Flow Pressure
	$M < 0.1$	$\approx$ Mean Flow Pressure
Profile Function of Temperature	Incompressible	not used
Constant	Incompressible	not used
Incompressible Ideal Gas Law	Incompressible	$\approx$ Mean Flow Pressure

Figure 1: 操作压力的推荐设定

你需要在操作压力面板中设定操作压力。菜单：Define/Operating Conditions...。

参考压力位置

对于不包括任何压力边界的不可压流动，FLUENT 会在每次迭代之后调节标准压力场以避免它浮动。这一操作是通过在（或接近）参考压力位置的单元中使用的压力实现的。在完全的压力场中减去单元内的压力值，从而保证参考压力位置的标准压力总为零。如果包含了压力条件，就不需要调节了，参考压力位置也忽略了。

参考压力位置默认为单元的中心或者接近点(0，0，0)。有时候你可能想要移动参考压力位置，也许要将它定位于绝对压力已知的点处（比如：如果你想将计算结果和实验数据比较）。要改变位置，请在操作压力面板中输入参考压力位置的新的坐标值（X，Y，Z）。菜单：Define/Operating Conditions...。

选择一个湍流模型

不幸的是没有一个湍流模型对于所有的问题是通用的。选择模型时主要依靠以下几点：流体是否可压、建立特殊的可行的问题、精度的要求、计算机的能力、时间的限制。为了选择最好的模型，你需要了解不同条件的适用范围和限制

这一章的目的是给出在 FLUENT 中湍流模型的总的情况。我们将讨论单个模型对 cpu 和内存的要求。同时陈述一下一种模型对那些特定问题最适用，给出一般的指导方针以便对于你需要的给出湍流模型。

雷诺平均逼近 vs 大涡模拟（LES）

在复杂形体的高雷诺数湍流中要求得精确的 N-S 方程的有关时间的解在近期内不太可能实现。两种可选择的方法用于把 N-S 方程不直接用于小尺度的模拟：雷诺平均和过滤。两种方法都介绍了控制方程的附加条件，这些条件用于使模型封闭（封闭意味着有足够的方程来解所有的未知数。）

对于所有尺度的湍流模型，雷诺平均 N-S 方程只是传输平均的数量。找到一种可行的平均流动变量可以大大的减少计算机的工作量。如果平均流动是稳态的，那么控制方程就不必包含时间分量，并且稳态状态解决方法会更加有效。甚至在暂态过程中计算也是有利的，因为时间步长在平均流动中取决于全局的非稳态。雷诺平均逼近主要用于实际工程计算中，还有使用的模型比如 Spalart-Allmaras，k-e 系列，k-ω 系列和 RSM。

LES 提供了一种方式，让依靠时间尺度模拟的大边界计算问题可以利用一系列的过滤方程。对于解确切的 N-S 方程，过滤是一种必要的方法，用于改变比过滤法尺度小的边界,通常用于网格大小。和雷诺平均一样，过滤法加入了未知的变量，必须模拟出来以便方程能够封闭。

必须强调的是 LES 应用于工业的流产模拟还处于起步阶段。回顾近期的出版物，典型的方法已经用于简单的几何形体。这主要是因为解决含有能量的湍流漩涡需要大量的计算机资源。很多成功的 LES 模型已经用于高度空间的离散化，而且花了很多精力来解决尺度比惯性附属区域大的方面。在中间流中用 LES 降低精度的方法没有很多的资料。另外，用 LES 解决平板问题还需要进一步的证实。

作为一个一般性的介绍，在这里推荐一般的湍流模型用雷诺平均对于实际的计算是十分有用的。在 10.7 中将会详细介绍的 LES 逼近，对你十分有用，如果你的计算机能力很强大或者有意更新你的计算机的话。这一章余下的部分将会介绍选择雷诺平均逼近模型。

雷诺平均

在雷诺平均中，在瞬态 N-S 方程中要求的变量已经分解位时均常量和变量。以速度为例：

$$u_i = \bar{u}_i + u_i^{'} \cdots\cdots\cdots (10.2-1)$$

这里 $\overline{u}_i$ 和 $u_i^{'}$ 时时均速度和波动分量。

相似的，像压力和其它的标量

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi_i' \cdots\cdots\cdots (10.2-2)$$

这里ϕ表示一个标量如压力，动能，或粒子浓度。

用这种形式的表达式把流动的变量放入连续性方程和动量方程并且取一段一段时间的平均，这样可以写成一下的形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (10.2\text{-}3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'}) \quad (10.2\text{-}4)$$

方程 10.2-3 和 10.2-4 称为雷诺平均 N-S 方程。它和瞬态雷诺方程又相同的形式，速度和其它的变量表示成为了其时均形式。由于湍流造成的附加的条件现在表现出来了。这些雷诺压力，必须被模拟出来以便使方程 10.2-4 封 $-\rho\overline{u_i' u_j'}$ 闭。

对于变密度的流体，方程 10.2-3 和 10.2-4 认为是 Favre 平均 N-S 方程，速度表示为了平均值。这样，方程 10.2-3 和 10.2-4 可以应用于变密度的流体。

Boussinesq 逼近 VS 雷诺压力转化模型

对于湍流模型，雷诺平均逼近要求在方程 10.2-4 的雷诺压力可以被精确的模拟。一般的方法利用 Boussinesq 假设把雷诺压力和平均速度梯度联系起来：

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \qquad (10.2\text{-}5)$$

Boussinesq假设使用在Spalart-Allmaras模型、*k-e*模型和*k-*ω 模型中。这种逼近方法好处是对计算机的要求不高。在Spalart-Allmaras模型中只有一个额外的方程要解。*k-e*模型和*k-*ω 模型中又两个方程要解。Boussinesq假设的不足之处是假设u_t是个等方性标量，这是不严格的。

可选的逼近，在 RSM 中，是用来解决在方程中的雷诺压力张量。另外要加一个方程。这就意味着在二维流场中要加五个方程，而在三维方程中要加七个方程。

在很多情况下基于 Boussinesq 假设的模型很好用，而且计算量并不是很大。但是 RSM 模型对于对层流有主要影响的各向异性湍流的状况十分适用。

The Spalart-Allmaras 模型

对于解决动力漩涡粘性，Spalart-Allmaras 模型是相对简单的方程。它包含了一组新的方程，在这些方程里不必要去计算和剪应力层厚度相关的长度尺度。Spalart-Allmaras 模型是设计用于航空领域的，主要是墙壁束缚流动，而且已经显示出和好的效果。在透平机械中的应用也愈加广泛。

在原始形式中 Spalart-Allmaras 模型对于低雷诺数模型是十分有效的，要求边界层中粘性影响的区域被适当的解决。在 FLUENT 中，Spalart-Allmaras 模型用在网格划分的不是很好时。这将是最好的选择，当精确的计算在湍流中并不是十分需要时。再有，在模型中近壁的变量梯度比在 *k-e* 模型和 *k-*ω 模型中的要小的多。这也许可以使模型对于数值的误差变得不敏感。想知道数值误差的具体情况请看 5.1.2。

需要注意的是 Spalart-Allmaras 模型是一种新出现的模型，现在不能断定它适用于所有的复杂的工程流体。例如，不能依靠它去预测均匀衰退，各向同性湍流。还有要注意的是,单方程的模型经常因为对长度的不敏感而受到批评，例如当流动墙壁束缚变为自由剪切流。

标准*k-e*模型

最简单的完整湍流模型是两个方程的模型，要解两个变量，速度和长度尺度。在FLUENT中，标准*k-e*模型自从被Launder and Spalding提出之后，就变成工程流场计算中主要的工具了。适用范围广、经济、合理的精度，这就是为什么它在工业流场和热交换模拟中有如此广泛的应用了。它是个半经验的公式，是从实验现象中总结出来的。

由于人们已经知道了*k-e*模型适用的范围，因此人们对它加以改造，出现了RNG *k-e*模型和带旋流修正*k-e*模型

RNG *k-e*模型

RNG *k-e*模型来源于严格的统计技术。它和标准*k-e*模型很相似，但是有以下改进：

- RNG模型在e方程中加了一个条件，有效的改善了精度。
- 考虑到了湍流漩涡，提高了在这方面的精度。
- RNG理论为湍流Prandtl数提供了一个解析公式，然而标准*k-e*模型使用的是用户提供的常数。
- 然而标准*k-e*模型是一种高雷诺数的模型，RNG理论提供了一个考虑低雷诺数流动粘性的解析公式。这些公式的效用依靠正确的对待近壁区域

这些特点使得RNG *k-e*模型比标准*k-e*模型在更广泛的流动中有更高的可信度和精度。

带旋流修正的 *k-e*模型

带旋流修正的 *k-e* 模型是近期才出现的，比起标准 *k-e* 模型来有两个主要的不同点。

- 带旋流修正的 *k-e* 模型为湍流粘性增加了一个公式。
- 为耗散率增加了新的传输方程，这个方程来源于一个为层流速度波动而作的精确方程

术语“realizable”，意味着模型要确保在雷诺压力中要有数学约束，湍流的连续性。

带旋流修正的 *k-e* 模型直接的好处是对于平板和圆柱射流的发散比率的更精确的预测。而且它对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流有很好的表现。

带旋流修正的 *k-e* 模型和 RNG *k-e* 模型都显现出比标准 *k-e* 模型在强流线弯曲、漩涡和旋转有更好的表现。由于带旋流修正的 *k-e*模型是新出现的模型,所以现在还没有确凿的证据表明它比RNG *k-e*模型有更好的表现。但是最初的研究表明带旋流修正的 *k-e* 模型在所有 *k-e* 模型中流动分离和复杂二次流有很好的作用。

带旋流修正的 *k-e* 模型的一个不足是在主要计算旋转和静态流动区域时不能提供自然的湍流粘度。这是因为带旋流修正的 *k-e* 模型在定义湍流粘度时考虑了平均旋度的影响。这种额外的旋转影响已经在单一旋转参考系中得到证实，而且表现要好于标准 *k-e* 模型。由于这些修改，把它应用于多重参考系统中需要注意。

标准 *k-*ω 模型

标准*k-*ω 模型是基于Wilcox *k-*ω 模型，它是为考虑**低雷诺数、可压缩性和剪切流**传播而修改的。Wilcox *k-*ω 模型预测了自由剪切流传播速率，像尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射，因而可以应用于墙壁束缚流动和自由剪切流动。标准*k-e*模型的一个变形是SST *k-*ω 模型，它在FLUENT中也是可用的，将在10.2.9中介绍它。

剪切压力传输（SST） *k-*ω 模型

SST *k-*ω 模型由Menter发展，以便使得在广泛的领域中可以独立于*k-e*模型，使得在近壁自由流中*k-*ω 模型有广泛的应用范围和精度。为了达到此目的，*k-e*模型变成了*k-*ω 公式。SST *k-*ω 模型和标准*k-*ω 模型相似，但有以下改进：

- SST *k-*ω 模型和*k-e*模型的变形增长于混合功能和双模型加在一起。混合功能是为近壁区域设计的，这个

区域对标准*k-ω*模型有效，还有自由表面，这对*k-e*模型的变形有效。

- SST *k-ω*模型合并了来源于ω方程中的交叉扩散。
- 湍流粘度考虑到了湍流剪应力的传波。
- 模型常量不同

这些改进使得SST *k-ω*模型比标准*k-ω*模型在在广泛的流动领域中有更高的精度和可信度。

雷诺压力模型（RSM）

在FLUENT中RSM是最精细制作的模型。放弃等方性边界速度假设，RSM使得雷诺平均N-S方程封闭，解决了关于方程中的雷诺压力，还有耗散速率。这意味这在二维流动中加入了四个方程，而在三维流动中加入了七个方程。

由于RSM比单方程和双方程模型更加严格的考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力快速变化，它对于复杂流动有更高的精度预测的潜力。但是这种预测仅仅限于与雷诺压力有关的方程。压力张力和耗散速率被认为是使RSM模型预测精度降低的主要因素。

RSM模型并不总是因为比简单模型好而花费更多的计算机资源。但是要考虑雷诺压力的各向异性时，必须用RSM模型。例如飓风流动、燃烧室高速旋转流、管道中二次流。

计算成效：cpu时间和解决方案

从计算的角度看Spalart-Allmaras模型在FLUENT中是最经济的湍流模型，虽然只有一种方程可以解。由于要解额外的方程，标准*k-e*模型比Spalart-Allmaras模型耗费更多的计算机资源。带旋流修正的*k-e*模型比标准*k-e*模型稍微多一点。由于控制方程中额外的功能和非线性，RNG*k-e*模型比标准*k-e*模型多消耗10～15%的CPU时间。就像*k-e*模型，*k-ω*模型也是两个方程的模型，所以计算时间相同。

比较一下*k-e*模型和*k-ω*模型，RSM模型因为考虑了雷诺压力而需要更多的CPU时间。然而高效的程序大大的节约了CPU时间。RSM模型比*k-e*模型和*k-ω*模型要多耗费50～60%的CPU时间，还有15～20%的内存。

除了时间，湍流模型的选择也影响FLUENT的计算。比如标准*k-e*模型是专为轻微的扩散设计的，然而RNG *k-e*模型是为高张力引起的湍流粘度降低而设计的。这就是RNG模型的缺点。

同样的，RSM模型需要比*k-e*模型和*k-ω*模型更多的时间因为它要联合雷诺压力和层流。

收敛性和稳定性

收敛性可能会受到很多因素影响。大量的计算单元，过于保守的亚松驰因子和复杂的流动物理性质常常是主要的原因。有时候很难确定你是否得到了收敛阶。在下面几节中，将会介绍提高收敛性并保证稳定性的数值控制和建模技巧。

在阅读这一节之前你应该首先了解选择离散格式和选择压力速度耦合方法中介绍的离散格式的选取以及分离求解器中压力速度耦合格式对于收敛性的影响。在设定亚松驰因子和修改代数多重网格参数中我们还会介绍亚松驰参数和多重网格的设定来提高收敛性。

判断收敛

没有判断收敛性的普遍准则。残差定义对于一类问题是有用的，但是有时候对其它类型问题会造成误导。因此，最好的方法就是不仅用残差来判断收敛性而且还要监视诸如阻力、热传导系数等相关的积分量。

对于大多数问题，FLUENT 默认的收敛判据已经足够了。这个判据需要标度的残差，标度的残差分别在分离求解器残差定义中的方程 7 和耦合求解器残差定义的方程 3 中定义。除了能量方程和 P-1 方程的标度残差判据为 10^-6，其它所有方程都是 10^-3。

但是有些时候这个判据是不合适的。下面列出了几种典型的情况。

- 如果你对流场的初始猜测很好，初始的连续性残差会很小从而导致连续性方程的标度残差很大。在这种情况下，检查未标度的残差并与适当的标度如入口的质量流速相比较是很有用的。
- 对于某些方程，如湍流量，较差的初始猜测可能会造成较高的标度因子。在这种情况下，标度的残差最

开始会很小，随后会呈非线性增长，最后减小。因此，最好是从残差变化的行为来判断收敛性而不仅仅是残差的本身值来判断收敛性。你应该确认在几步迭代（比如说 50 步）之后残差继续减小或者仍然保持较低值，才能得出收敛的结论。

另一个判断收敛性的流行方法就是要求未标度的残差减小到三阶量级。为了实现这一方法，FLUENT 提供了残差标准化，有关残差标准化的信息请参阅分离求解器残差定义和耦合求解器残差定义两节。在这种方法中，要求标准化的未标度残差降到 10^-3。但是这种要求在很多情况下可能是不合适的。

- 如果你提供了较好的初始猜测，残差可能不会降到三阶量级。比方说，在等温流动中，如果温度的初始猜测非常接近最终值，那么能量残差根本就不会降到三阶量级。
- 如果控制方程中包括的非线性源项在计算开始时是零，但是在计算过程中缓慢增加，残差是不会降到三阶量级的。例如，在封闭区域内部的自然对流问题，由于初始的均一温度猜测不会产生浮力，所以初始的动量残差可能非常接近零。在这种情况下，初始的接近零的残差就不适合作为残差的较好的标度。
- 如果所感兴趣的变量在所有的地方都接近零，残差不会降到三阶量级。例如，在完全发展的管流中，截面上的速度为零。如果这些速度初始化为零，那么初始的和最终的残差都接近零，因此也就不能期待降三阶量级。

在这种情况下，最好监视诸如阻力、总热传导系数等积分量来判断解的收敛。检查非标准化未标度的残差来确定这个残差和适当的标度相比是不是很小也是很有用的。我们可以考虑选择分离求解器残差定义中的方程 7 或者耦合求解器残差定义中的方程 3（默认）中定义的残差。

相反，如果初始猜测很差，初始的残差过大以至于残差下降三阶量级也不能保证收敛。这种情况对于初始猜测很难的 k 和 e 方程尤其常见。在这里，检查你所感兴趣的所有积分量就很有用了。如果解是不收敛的，你可以减少收敛公差，具体请参阅修改收敛性判据一节。

求解器使用概述

当你确定了模型和求解器（参阅使用求解器形式一节），你就可以运行求解器了。下面是你可以参阅的一般步骤：

1. 选择离散格式，如果使用分离求解器，你还可以选择压力插值格式（见选择离散格式一节）。
2. （只用于分离求解器）选择压力速度耦合方法（参阅选择压力速度耦和方法一节）。
3. 设定亚松驰因子（见设定亚松驰因子一节）。
4. （只用于耦合显式求解器）打开 FAS 多重网格（见打开 FAS 网格一节）。
5. 对求解器设定作任何附加的修改，具体的修改可以参阅介绍你所使用的模型的相关章节。
6. 初始化解（参阅初始化解一节）
7. 激活适当的解监视器（参阅监视解的收敛一节）。
8. 开始计算（参阅执行计算一节）。
9. 如果出现收敛性问题，请尝试收敛性和稳定性一节中所讨论的方法。

前三项的默认设定可以满足大多数问题而不必修改。下面将要介绍这三个以及其它解参数可以做什么样的修改，以及什么时候你希望做出修改。上面所列出的步骤应用于所有定常状态的计算。具体可以参阅非定常解程序的时间相关模拟。

选择离散格式

FLUENT 允许你选择每一个控制方程的对流项的离散格式（对于粘性项自动使用二阶精度）当使用分离求解器时，在默认的情况下，所有的方程都是使用一阶迎风离散来解对流问题。当使用耦合求解器时，在默认的情况下，流动方程是二阶格式解出的，其它方程是用一阶格式解出的。关于 FLUENT 中离散格式的完全介绍请见离散一节。

除此之外，当你使用分离求解器时，你可以指定压力插值格式，有关压力插值格式的相关内容可以参阅

前面的介绍。

一阶与二阶的比较

当流动和网格成一条线时（如：矩形网格或者六面体网格模拟矩形导管的层流流动），可以使用一阶迎风离散格式。但是，当流动和网格不在一条线上时（即：流动斜穿网格线）一阶对流离散增加了对流离散的误差（数值耗散）。对于三角形和四面体网格，流动从来就不会和网格成一条线，此时一般要使用二阶离散来获取更高精度的结果。对于四边形或者六面体网格，如果使用二阶离散格式，尤其是对于复杂流动来说，你可以获取更好的结果。

总而言之，一阶离散一般会比二阶离散收敛得好，但是精度要差，尤其是对于三角形或者四面体网格精度更差。关于控制收敛性的信息请参阅收敛性和稳定性一节。

对于大多数情况，你可以在计算的开始使用二阶格式。对于有些情况，你应该以一阶离散开始计算，在进行了初步迭代之后再转到二阶格式。例如，如果你解高马赫数流动问题，初始解科所预期的解相差较大，你就应该先用一阶格式迭代几步然后打开二阶格式继续计算直至收敛。

对于与网格成一条线的简单流动（如：划分为矩形网格或者六面体网格的矩形导管的层流流动），数值耗散自然会很低，所以一般使用一阶格式替代二阶格式而不损失精度。

最后，如果你使用二阶格式遇到收敛性问题，你就应该尝试使用一阶格式。

幂率和 QUICK 格式

对于旋转和涡流来说，如果你使用四边形或者六面体网格，QUICK 离散格式会比二阶格式产生更为精确的结果。但是，一般说来二阶格式已经足够了，QUICK 格式也未必会提高多少精度。

我们还可以选择幂率格式，但是一般说来它不会比一阶格式精确多少。

选择压力插值格式

如压力插值格式所述，当使用分离求解器时我们可以采用很多压力插值格式。对于大多数情况，标准格式已经足够了，但是对于特定的某些模型使用其它格式可能会更好：

- 对于具有较大体积力的问题，推荐使用体积力加权格式。
- 对于具有高涡流数，高 Rayleigh 数自然对流，高速旋转流动，包含多孔介质的流动和高度扭曲区域的流动，使用 PRESTO!格式。

注意：PRESTO!只能用于四边形或者六面体网格。

- 对于可压流动推荐使用二阶格式。
- 当其它格式不适用时，使用二阶格式来提高精度（如：对于流过具有非六面体或者非四边形网格的曲面边界的流动）。

用户输入

你可以在解控制面板（如下图）中指定离散格式，如果是使用分离求解器还可以选择压力插值格式。菜单：Solve/Controls/Solution...。

在离散框下面列出的每一个标量方程（对于分离求解器，有动量、能量、湍流动能、能量等，对于耦合求解器，有湍流动能、湍流耗散速度）中，你可以在下拉列表中选择一阶迎风、二阶迎风、幂率或者 QUICK 格式。对于耦合求解器的流动方程（其中包括动量和能量），你既可以选择一阶迎风也可以选择二阶迎风格式。上面的面板是分离求解器对应的面板。

如果你使用分离求解器，在离散框中的压力后面的下拉列表中选择压力插值格式。你可以选择标准、线性、二阶、体积力权重或者（只用于四边形或六面体网格）PRESTO!。

如果你要改变离散的设定，但是你要回到 FLUENT 求解器默认的设定中修改，你可以点击默认按钮。此时所有的设定都改为默认设定，同时默认按钮就会变成重置按钮。要改回设定，你可以点击重置按钮。

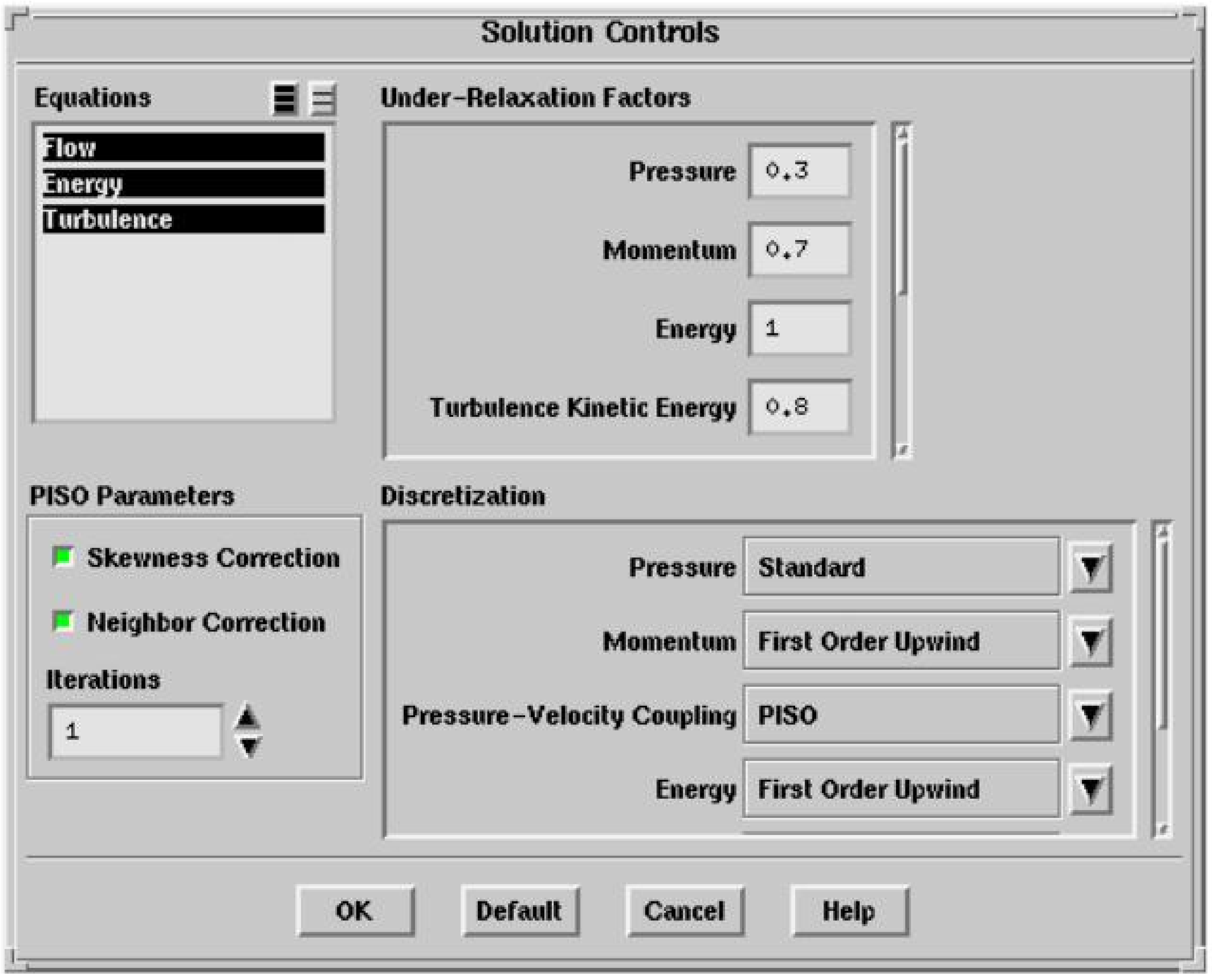


Figure 1: 分离求解器的解控制面板

选择压力速度耦合方法

在分离求解器中，FLUENT 提供了压力速度耦和的三种方法：SIMPLE，SIMPLEC 以及 PISO。定常状态计算一般使用 SIMPLE 或者 SIMPLEC 方法，对于过渡计算推荐使用 PISO 方法。PISO 方法还可以用于高度倾斜网格的定常状态计算和过渡计算。需要注意的是压力速度耦合只用于分离求解器，对于耦合求解器你不可以使用它。

SIMPLE 与 SIMPLEC 比较

在 FLUENT 中，可以使用标准 SIMPLE 算法和 SIMPLEC（SIMPLE-Consistent）算法，默认是 SIMPLE 算法，但是对于许多问题如果使用 SIMPLEC 可能会得到更好的结果，尤其是可以应用增加的亚松驰迭代时，具体介绍如下。

对于相对简单的问题（如：没有附加模型激活的层流流动），其收敛性已经被压力速度耦合所限制，你通常可以用 SIMPLEC 算法很快得到收敛解。在 SIMPLEC 中，压力校正亚松驰因子通常设为 1.0，它有助于收敛。但是，在有些问题中，将压力校正松弛因子增加到 1.0 可能会导致不稳定。对于这种情况，你需要使用更为保守的亚松驰或者使用 SIMPLE 算法。对于包含湍流和/或附加物理模型的复杂流动，只要用压力速度耦合做限制，SIMPLEC 会提高收敛性。它通常是一种限制收敛性的附加模拟参数，在这种情况下，SIMPLE 和 SIMPLEC 会给出相似的收敛速度。

PISO

对于所有的过渡流动计算，强烈推荐使用 PISO 算法邻近校正。它允许你使用大的时间步，而且对于动量和压力都可以使用亚松驰因子 1.0。对于定常状态问题，具有邻近校正的 PISO 并不会比具有较好的亚松驰因子的 SIMPLE 或 SIMPLEC 好。

对于具有较大扭曲网格上的定常状态和过渡计算推荐使用 PISO 倾斜校正。

当你使用 PISO 邻近校正时，对所有方程都推荐使用亚松驰因子为 1.0 或者接近 1.0。如果你只对高度扭曲的网格使用 PISO 倾斜校正，请设定动量和压力的亚松驰因子之和为 1.0（比如：压力亚松驰因子 0.3，动量亚松驰因子 0.7）。如果你同时使用 PISO 的两种校正方法，推荐参阅 PISO 邻近校正中所用的方法。

用户输入

你可以在解控制面板（如下图）中指定压力速度耦合方法。菜单：Solve/Controls/Solution...。

在离散框下面的压力速度耦合下拉菜单中选择 SIMPLE，SIMPLEC 或者 PISO。

如果你选择 PISO，面板就会扩展到 PISO 参数设定面板。在默认的情况下，倾斜校正和邻近校正都是打开的。如果你只想使用一种校正，你可以关闭适当的选项。默认的迭代数为 1，你不必修改这个值。

用户输入

设定亚松驰因子

如亚松驰一节所述，分离求解器使用亚松驰来控制每一步迭代中的计算变量的更新。这就意味着，使用分离求解器解的方程，包括耦合求解器所解的非耦合方程（湍流和其他标量）都会有一个相关的亚松驰因子。

在 FLUENT 中，所有变量的默认亚松驰因子都是对大多数问题的最优值。这个值适合于很多问题，但是对于一些特殊的非线性问题（如：某些湍流或者高 Rayleigh 数自然对流问题），在计算开始时要慎重减小亚松驰因子。

使用默认的亚松驰因子开始计算是很好的习惯。如果经过 4 到 5 步的迭代残差仍然增长，你就需要减小亚松驰因子。

有时候，如果发现残差开始增加，你可以改变亚松驰因子重新计算。在亚松驰因子过大时通常会出现这种情况。最为安全的方法就是在对亚松驰因子做任何修改之前先保存数据文件，并对解的算法做几步迭代以调节到新的参数。最典型的情况是，亚松驰因子的增加会使残差有少量的增加，但是随着解的进行残差的增加又消失了。如果残差变化有几个量级你就需要考虑停止计算并回到最后保存的较好的数据文件。

注意：粘性和密度的亚松驰是在每一次迭代之间的。而且，如果直接解焓方程而不是温度方程（即：对 PDF 计算），基于焓的温度的更新是要进行亚松驰的。要查看默认的亚松弛因子的值，你可以在解控制面板点击默认按钮。

对于大多数流动，不需要修改默认亚松弛因子。但是，如果出现不稳定或者发散你就需要减小默认的亚松弛因子了，其中压力、动量、k 和 e 的亚松弛因子默认值分别为 0.2，0.5， 0.5 和 0.5。对于 SIMPLEC 格式一般不需要减小压力的亚松弛因子。在密度和温度强烈耦合的问题中，如相当高的 Rayleigh 数的自然或混合对流流动，应该对温度和/或密度（所用的亚松弛因子小于 1.0）进行亚松弛。相反，当温度和动量方程没有耦合或者耦合较弱时，流动密度是常数，温度的亚松弛因子可以设为 1.0。

对于其它的标量方程，如漩涡，组分，PDF 变量，对于某些问题默认的亚松弛可能过大，尤其是对于初始计算。你可以将松弛因子设为 0.8 以使得收敛更容易。